

物理实验设计 与研究

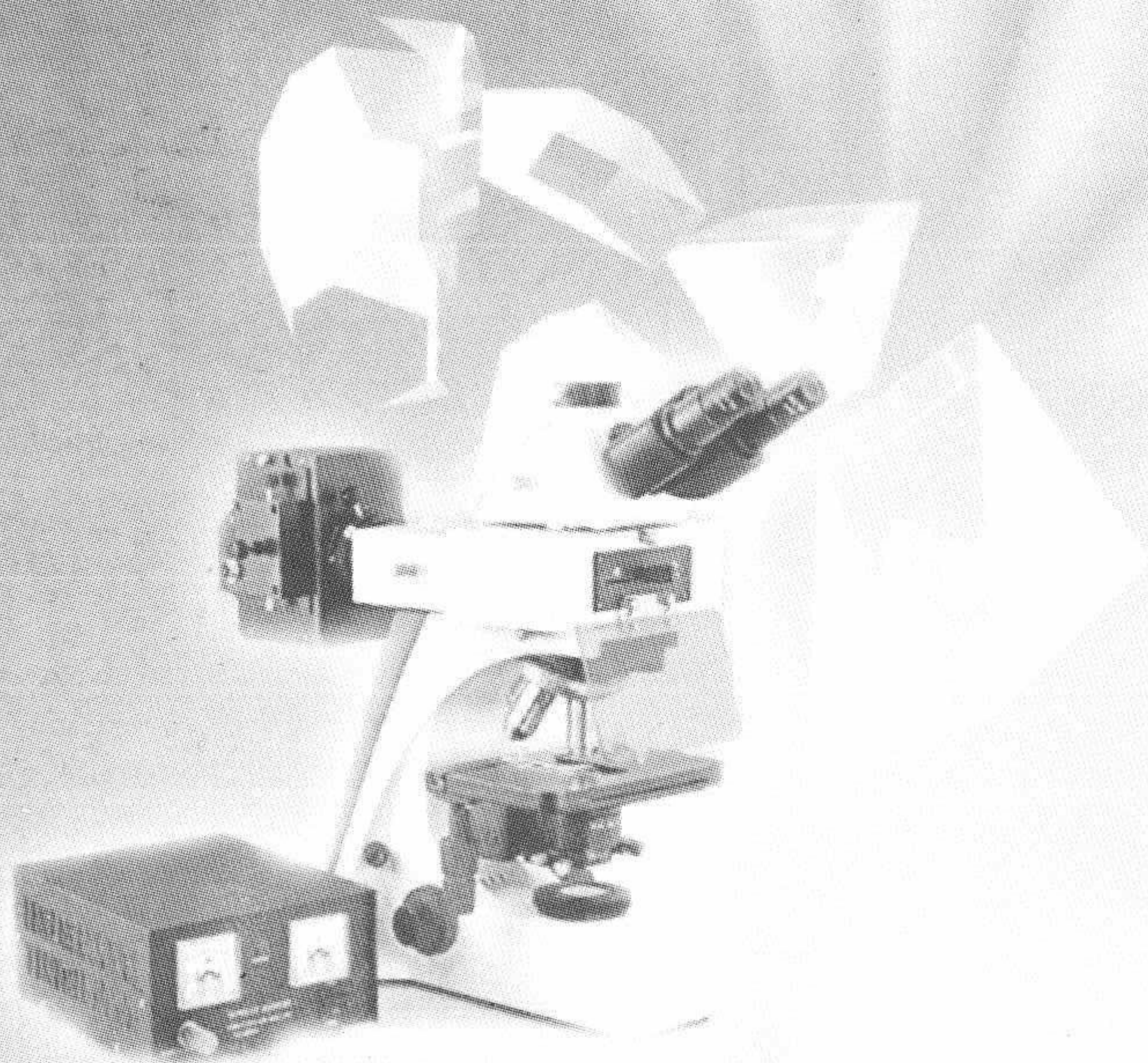
王京康 高 雁 韩新华/著



山西出版集团
山西人民出版社

物理实验设计 与研究

王京康 高雁 韩新华/著



山西出版集团
山西人民出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

物理实验设计与研究 / 王京康, 高雁, 韩新华著. — 太原: 山西人民出版社, 2009.4

ISBN 978-7-203-06397-1

I. 物… II. ①王…②高…③韩… III. 物理学—实验—研究 IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第038303号

物理实验设计与研究

著 者: 王京康 高 雁 韩新华

责任编辑: 高美然

装帧设计: 王聚金

出 版 者: 山西出版集团·山西人民出版社

地 址: 太原市建设南路 21 号

邮 编: 030012

发行营销: 0351-4922220 4955996 4956039

0351-4922127 (传真) 4956038 (邮购)

E - mail : sxskcb@163.com 发行部

sxskcb@126.com 总编室

网 址: www.sxskcb.com

经 销 者: 山西出版集团·山西人民出版社

承 印 者: 山西嘉祥印刷包装有限公司

开 本: 890mm × 1240mm 1/32

印 张: 16.5

字 数: 450 千字

印 数: 1-500 册

版 次: 2009 年 4 月 第 1 版

印 次: 2009 年 4 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-203-06397-1

定 价: 46.00 元

如有印装质量问题请与本社联系调换

前 言

科学技术的高速发展对人的创新能力的要求越来越高,加强学生创新能力的培养,是高等教育改革的重要任务。为了培养高素质的具有创新能力的科学研究与应用型人才,必须让学生从实践中发现问题、解决问题和将已有的知识运用到实际中去。物理学是一门基础学科,它的发展已经改变和正在继续改变着整个世界。物理学又是一门实验科学。古往今来,物理学的发展和创新的无不与物理实验密切联系,物理学中的创新成果都源自实验,而且都必须经过实验的检验。《物理实验设计与研究》是作者多年来从事大学物理实验教学,指导学生论文,参照大量的书籍和参考文献的基础上编写而成的,对学生动手能力、研究能力,特别是创新能力的培养,有很大的指导作用。

本书由王京康、高雁、韩新华(按姓氏笔画排名)三位老师共同撰写。本书共五章:第一章:力学实验设计与研究,第二章:热学实验设计与研究,由王京康老师撰写;第三章:光学实验设计与研究,由高雁老师撰写;第四章:电学实验设计与研究,第五章:近代物理实验设计与研究,由韩新华老师撰写。

本书的特点:每一个实验都具有独立性,由理论分析、实验设计、实验过程、数据分析、结论分析五部分组成,从理论研究出发,以物理实验为基础,做到理论与实践相结合。实验的要求从初步学习如何设计实验到研究一个全新的课题,内容涵盖力学、热学、光学、电磁学、近代物理学等各个领域,用计算机语言处理物理数据,把现代化的手段应用于物理实验教学,使大学物理实验具备了趣味性、先进性、创新性和有效性的特点。

本书适用面较广,既可作为高等院校物理专业的实验教学参考

书,也可用做非物理专业大学物理实验课的教学参考。

在本书的编写过程中,参阅了书末所列的参考书目。对于这些著作的作者,这里一并致以衷心的感谢。

由于水平有限,缺点和错误在所难免,殷切希望读者给予批评指正。

作者

2008.12

目 录

第一章 力学实验设计与研究

- 1.1 摩擦系数的理论分析与实验研究 (3)
- 1.2 弹簧振子劲度系数的实验研究与分析 (16)
- 1.3 弹簧振动周期的实验研究 (31)
- 1.4 单摆周期公式的实验研究 (44)
- 1.5 单摆周期与摆角公式实验设计与研究 (55)
- 1.6 测量物体转动惯量不同方法的研究 (67)

第二章 热学实验设计与研究

- 2.1 液体粘滞系数测定与研究 (85)
- 2.2 液体粘滞系数实验的误差分析研究 (99)
- 2.3 金属热膨胀系数测量的实验研究 (111)
- 2.4 牛顿冷却定律的理论分析与实验研究 (121)
- 2.5 液体比热容测定的实验设计与研究 (136)
- 2.6 液体密度测量分析与研究 (150)

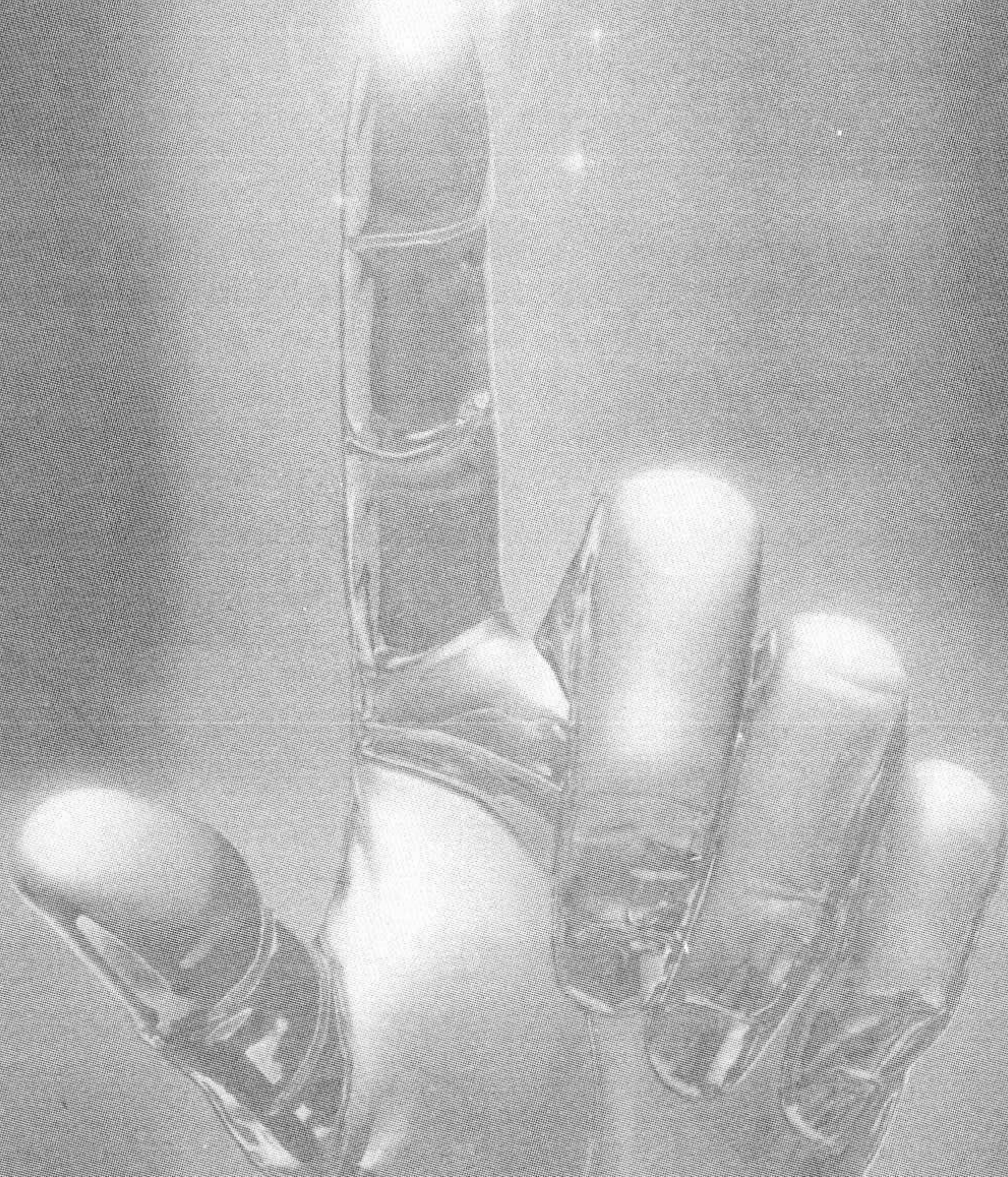
第三章 光学实验设计与研究

- 3.1 牛顿环实验影响因素的探究 (171)
- 3.2 调制与假彩色编码实验的研究 (181)
- 3.3 光栅常数测定的实验研究 (193)
- 3.4 平行玻片折射率实验的研究 (205)
- 3.5 组合干涉仪的实验研究 (215)
- 3.6 不同衍射屏的夫琅禾费衍射光强的计算与分析 (228)

3.7	分光计测液体折射率的实验研究	(241)
3.8	光学方法测量细丝直径	(256)
3.9	气体折射率随压强变化的实验研究	(267)
3.10	双棱镜干涉实验的深入研究	(277)
3.11	双光干涉的实验研究	(288)
3.12	分光计测三棱镜折射率的实验研究	(301)
3.13	光的时空相干性实验研究	(315)
3.14	光偏振的实验研究	(325)
3.15	光学方法测量薄膜的厚度	(339)
第四章 电学实验设计与研究		
4.1	压电式传感器的实验研究	(353)
4.2	电桥的实验设计与研究	(365)
4.3	电容测量方法的研究	(379)
4.4	光电效应伏安特性研究	(394)
4.5	普朗克常数的测定的实验研究	(408)
第五章 近代物理实验设计与研究		
5.1	核磁共振测量F的朗德因子和旋磁比	(423)
5.2	光磁共振中测量地磁场的研究	(436)
5.3	光磁共振中弛豫时间与共振线宽的测量研究	(454)
5.4	光拍频法光速测量研究	(467)
5.5	用塞曼效应实验来测量光速	(478)
5.6	核磁共振实验仪中永磁铁磁场分布测量	(492)
5.7	法拉第效应的实验探索	(506)
参考文献		(521)

第一章

力学实验设计与研究





1.1 摩擦系数的理论分析与实验研究

摩擦是一个古老而年轻的话题,经历了几个世纪的发展,现已发展为一门学科——“摩擦学”。摩擦学是一个十分复杂的跨学科科学,涉及表面物理和化学等方面的专题。迄今为止发现的与摩擦有关的因素多达百个以上,而在一般的基础物理教材中,很少谈及摩擦力的起因和本质问题,只给出一些经验规律,即古典摩擦定律。事实上,在摩擦学中目前也还没有一套十分成熟的摩擦理论能够一劳永逸地完全解决摩擦问题,许多理论都是在一定范围实验的基础上总结出来后,再设法在理论上找出较为合理解释。

1. 摩擦的分类

摩擦可以发生在任何物质形态之间,如固体与固体、固体与液体、固体与气体之间都存在摩擦。日常生活中,固体之间的摩擦较为常见,研究的也较为成熟。固体之间的摩擦,按摩擦表面的润滑情况不同,可分为四种类型,即干摩擦、边界摩擦、液体摩擦和混合摩擦,现分别介绍如下。

1.1 干摩擦

干摩擦是指固体在摩擦表面没有任何润滑剂和其他杂质时所发生的摩擦。严格地说,只有在没有湿润的纯净表面上才会出现名符其实的干摩擦,一般只有在真空条件下或表面膜被破坏的瞬间才会出现。但在接触表面可能存在自然污染膜,所以通常说的干摩擦是指在两个固体表面之间可能存在各种自然污染膜的一种摩擦。

1.2 边界摩擦

摩擦表面之间只有一层很薄($0.1\mu\text{m}$)油膜时,所产生的摩擦称为边界摩擦,这层薄膜称为边界膜。边界膜的性质是影响摩擦的主要因素。当边界润滑作用较差时,某些部分的边界膜被破坏,造成摩擦面直接接触,从而形成干摩擦,使摩擦系数增大。发动机的汽缸与活

塞环,机床导轨等都属于这种摩擦。

1.3 液体摩擦

液体把相对运动的摩擦表面完全隔开,物体表面不发生直接接触的摩擦叫液体摩擦。这时摩擦主要发生在摩擦表面之间的润滑膜内。物体移动时,物体之间的摩擦面没有直接接触,期间除了边界润滑膜外,还有流动油膜,因此摩擦系数仅发生在润滑油之间,运动阻力仅由润滑油分子间的吸引力(内聚力)形成,因而摩擦系数很小,一般在 0.01 ~ 0.001 的范围内。在合理的工作条件下,润滑充分的轴承,齿轮属于这种摩擦。

1.4 混合摩擦

混合摩擦亦称为混合润滑,是属于一种不稳定的摩擦,它存在着润滑油黏度所产生的粘滞阻力,也存在着物体表面微凸体接触面所产生的摩擦阻力。可分为半干摩擦和半液体摩擦。前者是指同时干摩擦和边界摩擦的一种混合状态的摩擦,趋于干摩擦。而后者则是指同时存在边界液体摩擦的一种混合状态的摩擦,趋于液体摩擦。

2. 干摩擦机理

干摩擦是一种非常复杂的现象。从 15 世纪意大利科学家达·芬奇开始对固体摩擦研究以来,已经过了几个世纪的研究历程,其机理虽有过“机械”理论、“粘着”理论等学说,但如前所说,至今对摩擦现象的本质仍然缺乏一个完善的、统一理论阐述。目前为大多数人普遍接受的理论就是下边介绍的“粘着——机械啮合理论”。

一般固体表面为脏污膜所覆盖,这些膜夹杂在摩擦面之间,就起到一种润滑的作用,与没有这层膜的情况相比,表现出不同的摩擦现象和摩擦力。要想除掉这层脏污膜,在大气中是不可能的,所以一般摩擦规律就是根据大气中固体摩擦情况得出的。

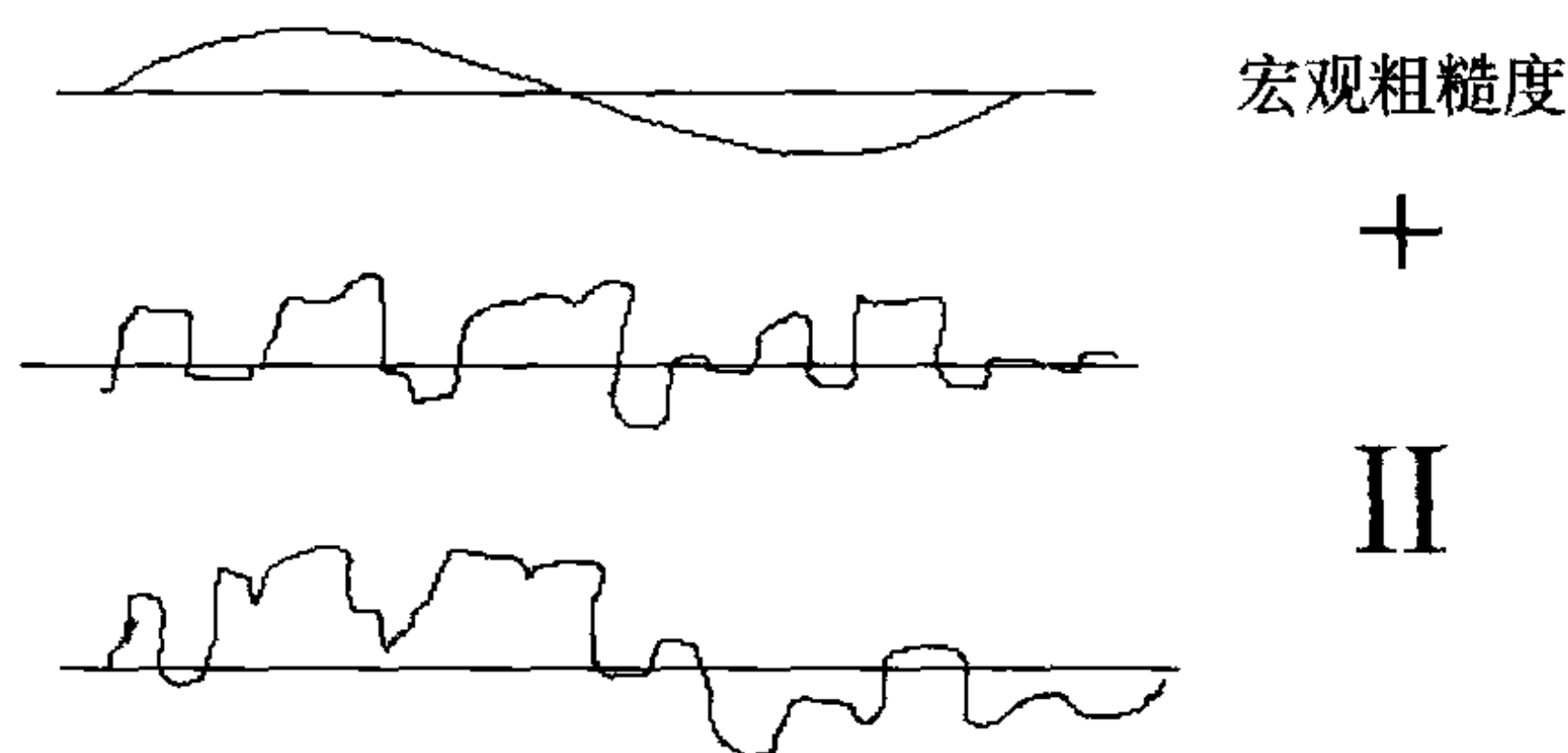
固体表面有不同的粗糙程度,表面的粗糙度是由于表面上有彼此波长很短的凸凹体形成的,叫微观粗糙度,还有加工时形成的波长很长的不平度,叫宏观粗糙度,最后形成的表面为这两者的叠加,如

图一所示。

两个摩擦表面相互接触时,由于表面上微凸体的高度参杂不齐,因此两表面上的微凸体形成犬牙交错的相互接触,这就决定了产生摩擦时有下面两种基本的表面相互作用。

一种相互作用是当两个表面压紧时,在接触区的某些部分产生的粘着力。这种粘着力的产生,主要是由于接触点的接触面积积极小,其局部压力很大,往往超过软材料的屈服强度产生塑性形变,因而使表面膜破裂。在表面膜破裂处,基体材料直接接触,在表面力的作用下,形成牢固的粘着点,使凸峰与凸峰就像被分子力“熔焊”在一起。当物体作相对运动时,为了将这些“熔焊”在一起的点撕裂所需要的力就构成粘着力。一般而言,在表面粗糙度不太大的情形下,粘着力是构成摩擦力的主要部分。显然影响粘着力的主要因素是物体表面之间的实际接触面积。由图二知,物体间的实际接触面积是比较小的,它是许多接触点的接触面积的总和,一般仅为表观接触面积的数百分之一到数万分之一。查阅大量资料后发现,粘合力实质是分子吸引力,分子吸引力和接触面上相互吸引的分子对的数目成正比,而相互吸引的分子对数目又和实际接触面积成正比。因此,一般可以认为粘着力和实际接触面积成正比。

另一种相互作用是物体在接触表面微凸部分与凹入部分互相嵌入所形成相对运动时的机械啮合阻力,它主要与两物体表面硬度和粗糙度有关系。



图一



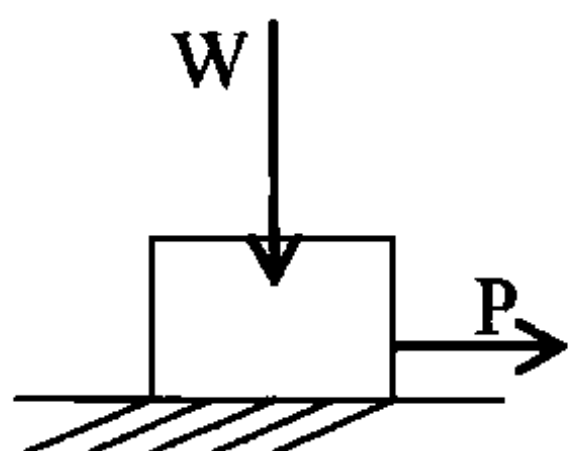
图二

综上所述，摩擦力可以看作粘着力与粗糙表面互相嵌入而行成的机械啮合阻力之和。

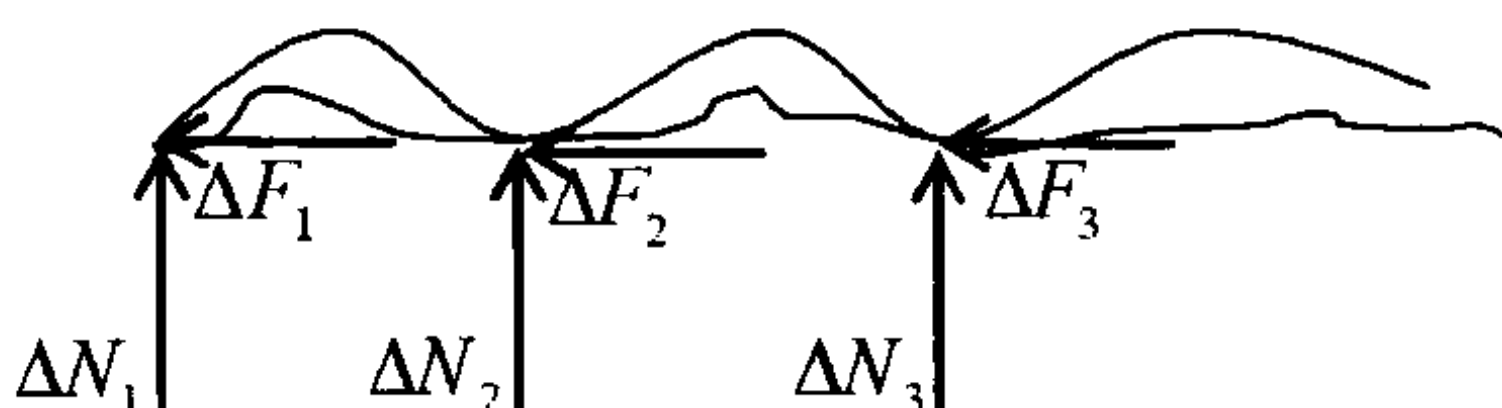
3. 影响干摩擦系数的因素

3.1 干摩擦古典理论(库仑 - 阿蒙顿定律)

为了说明干摩擦，我们把重 W 的物体置于水平的粗糙面上，并施加水平拉力 P 如图三所示：



图三



图四

此时为了达成平衡；地板沿着接触面施加分布向上的法向力 ΔN_n 及向左的摩擦力 ΔF_n 于物体上，将两接触面放大，即可了解法向力与摩擦力产生的原因，如图四所示。可以看出两不规则的接触面上各接触点的反作用力其分力即为摩擦力 ΔN_n 与 ΔF_n ，为了分析方便，将分布的法向力与摩擦力以其合力 N 及 F 表示。随着 P 的增大， F 亦随之增大，直到达到最大值 F_s ， F_s 称之为最大静摩擦力。由实验得知极限静摩擦力 F_s 的大小与正压力 N 的大小成正比，可表示为：

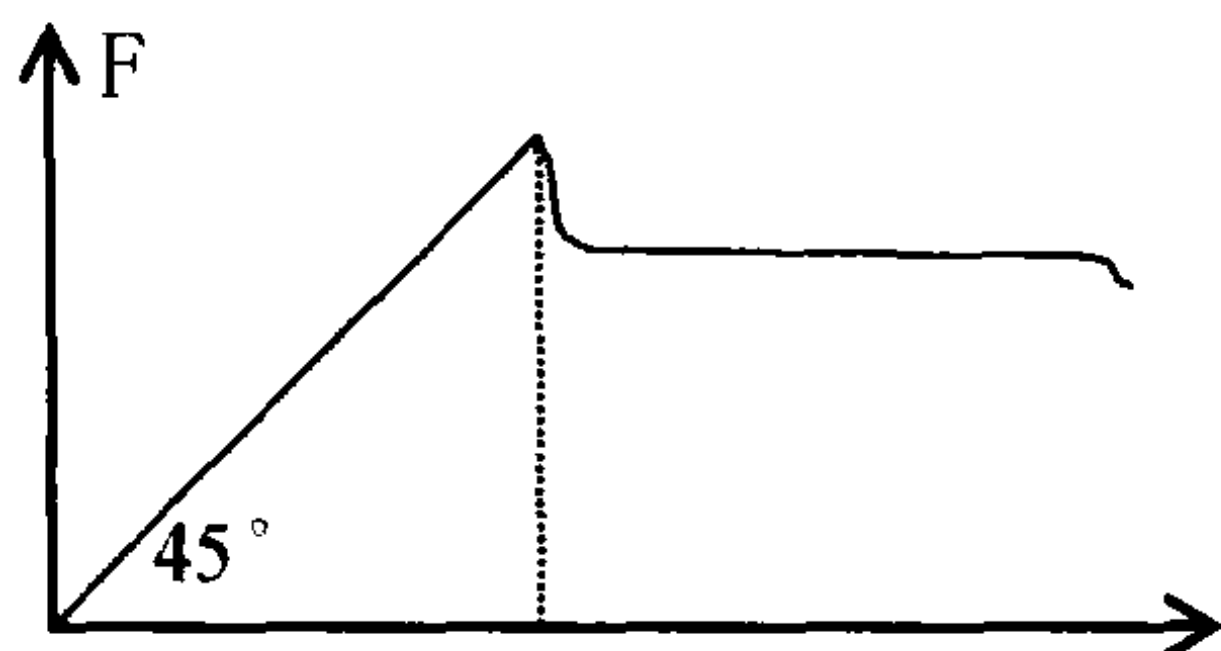
$$F_s = \mu_s N \quad (1)$$

其中 μ_s 为静摩擦系数。若 P 继续增大，并大于 F_s 时，使得接触点发生变形及破裂，而物体产生运动。此时摩擦力减少为 F_k ， F_k 称为动摩擦力。由实验得知，滑动中的物体其摩擦力 F_k 的大小与正压力 N 的大小成正比，可表示为：

$$F_k = \mu_k N \quad (2)$$

其中 μ_k 为动摩擦系数。 F_s 和 F_k 与接触面积无关。以上即为库仑 - 阿蒙顿第一定律。这样，重物 W 与支撑面上的摩擦力可分为两个阶段，

即静摩擦阶段和滑动摩擦阶段。如图五所示：



图五

由图可以明显看出滑动摩擦力小于最大静摩擦力。这一结论为库仑—阿蒙顿第三定律。另外，第二定律指出，摩擦力的方向总是与接触表面相对运动速度的方向相反，摩擦力的大小与速度无关。

3.2 影响干摩擦系数的主要因素

根据库仑—阿蒙顿定理，摩擦系数只于材料的性质和接触面的粗糙程度有关，与正压力无关；对于确定的材料，粗糙程度越大，摩擦系数越大。但是，实验表明，摩擦系数实际上与许多因素有关。而且关系比较复杂，本文下面的实验主要研究了摩擦系数与正压力和接触面粗糙程度的关系，并试图给出一定的理论说明。

3.2.1 摩擦系数与正压力的关系测定

实验装置较为简单，主要用到测力计、质量为 142g 的木块、砝码及木板。实验中，在木板上用测力计水平匀速的拉动木块，测量摩擦力的大小。为了区分最大静摩擦力与滑动摩擦力，让测力计指针带动一纸质游标一起运动，游标穿在棉线上，由于靠摩擦可停在任一位置，这样最大静摩擦力大小的位置由游标记录下来。滑动摩擦力的大小由测力计读出。

实验时依次在木块上增加 50g 的砝码，并记录滑动摩擦力和最大静摩擦力的大小，然后再分别求出最大静摩擦系数和滑动摩擦系数。如表 1。

由表中数据显示，最大静摩擦系数随着正压力的逐渐增大而缓慢增大，滑动摩擦系数随着正压力的增大在误差范围内没有明显的变化。还用刚才的木块，把第一次作实验时的底面积(74.69cm²)改为

侧面积(35.89cm^2)来重复上述实验,如表 3.2。我们发现两组数据几乎一样,且两组数据所显示的规律也完全一样,说明摩擦系数与接触面积无关。

由上面的实验结果可以看出:①静摩擦系数与正压力有关;②动摩擦系数在误差范围内与正压力无关;③静摩擦系数和动摩擦系数与接触面积都无关。这一结论显然与库仑—阿蒙顿定律有一定出入。下面我们对这一结论作一简单的分析。

如前所述,木块与木块之间的接触面在微观状态下是凸凹不平的,摩擦面之间的接触不发生在整个接触面上(表观接触面),而是发生在实际接触面积上,即物体之间的正压力实际上只由占摩擦面很小部分的实际接触面积承受。故在正压力不变只改变表观接触面积时,实际接触面积几乎不变,因而摩擦系数几乎不发生变化。

表 1 ($S=74.69\text{cm}^2$)

其他 质量	$F_s(\text{N})$	$F_k(\text{N})$	μ_s	μ_k	$\overline{\mu_s}$	$\overline{\mu_k}$
142(g)	0.57	0.31	0.401	0.218	0.391	0.225
	0.55	0.31	0.378	0.218		
	0.56	0.34	0.394	0.239		
192(g)	0.80	0.46	0.417	0.240	0.398	0.239
	0.80	0.47	0.417	0.245		
	0.75	0.45	0.391	0.234		
242(g)	0.90	0.59	0.372	0.244	0.413	0.248
	0.92	0.61	0.380	0.252		
	0.97	0.60	0.401	0.248		
292(g)	1.25	0.70	0.428	0.240	0.434	0.233
	1.28	0.69	0.438	0.236		
	1.28	0.65	0.438	0.223		
342(g)	1.50	0.80	0.439	0.234	0.436	0.231
	1.48	0.82	0.433	0.240		
	1.49	0.75	0.436	0.219		

续表 1 ($S=74.69\text{cm}^2$)

442(g)	2.13	1.00	0.482	0.226	0.495	0.221
	2.19	0.95	0.495	0.215		
	2.25	0.98	0.509	0.222		

表 2 ($S=35.89\text{cm}^2$)

其他 质量	$F_s(\text{N})$	$F_k(\text{N})$	μ_s	μ_k	$\overline{\mu_s}$	$\overline{\mu_k}$
142(g)	0.52	0.34	0.366	0.239	0.373	0.231
	0.54	0.31	0.380	0.225		
	0.53	0.32	0.373	0.229		
192(g)	0.72	0.45	0.375	0.234	0.387	0.243
	0.78	0.48	0.406	0.250		
	0.73	0.47	0.380	0.245		
242(g)	0.97	0.58	0.401	0.240	0.397	0.238
	0.95	0.55	0.393	0.227		
	0.96	0.60	0.397	0.248		
292(g)	1.20	0.68	0.411	0.233	0.417	0.234
	1.23	0.70	0.421	0.240		
	1.22	0.67	0.418	0.229		
342(g)	1.48	0.80	0.433	0.234	0.436	0.232
	1.49	0.79	0.436	0.231		
	1.50	0.79	0.439	0.231		
392(g)	1.82	0.92	0.464	0.235	0.461	0.236
	1.80	0.91	0.459	0.232		
	1.80	0.95	0.459	0.242		
442(g)	2.20	1.05	0.498	0.238	0.501	0.232
	2.19	1.02	0.495	0.231		
	2.25	1.00	0.509	0.226		

由于木块的材质较软，每一接触点上承受很大的压力而使各接触点产生塑性形变，凸峰凸峰粘着现象比较突出，“焊接”作用十分明显。当物体做相对运动或有相对运动的趋势时，粘着力就构成了切向

摩擦力的主要部分。随着各接触点的压强增大,使各接触点的塑性形变增大,从而使实际接触面积增大,可以认为实际接触面积与正压力成正比。因为粘着力与接触面上的分子对数量成正比,所以粘着力与正压力成正比。在另一方面,随着正压力的增加,机械啮合程度加深,尤其在木块间发生静摩擦时,不会由于相对运动而破坏表面的粗糙程度,由于凸凹镶嵌而产生的机械啮合阻力会随正压力的增大而增大。将粘着力和啮合阻力加在一起,所以在发生静摩擦时,随着压力的增大,最大静摩擦力增加的幅度比正压力增大的幅度大,由摩擦公式 $\mu = \frac{F_s}{N}$ 看出,静摩擦系数会缓慢增大。

当木块之间发生滑动摩擦时,数据显示滑动摩擦系数没有明显的变化。我们考虑有两方面的原因:一是因为滑动摩擦时接触点上的塑性形变会小于静摩擦时的塑性形变,实际接触面积比静摩擦时略小,所以粘合力增加的幅度较小。二是发生滑动摩擦时,因摩擦导致滑动面有磨损,一些摩擦微粒夹杂在两接触表面之间,会削弱“凹凸体”机械啮合阻力。因而滑动摩擦时,随着压力的增大,滑动摩擦力增加的幅度与正压力增加的幅度几乎相同,由公式 $\mu = \frac{F_k}{N}$ 知,动摩擦系数在误差范围内几乎不变。

以上只是木与木之间在正压力不太大的情况下摩擦系数与正压力的关系,如果改变材料的性质,如金属与金属、木与金属等之间的摩擦系数与正压力的关系则会随材料的性质有所改变。

3.2.2 摩擦系数与接触面粗糙程度的关系

不管在现行的初中还是高中教材中,都有类似“大量的实验表明,摩擦力的大小跟接触面积的粗糙程度有关,接触面粗糙程度越大摩擦力就越大”这样的论述。一些大学物理教材也只是含糊地提到滑动摩擦力的大小与接触面的粗糙程度有关系,具体什么关系却没有详细介绍,仍给人一种类似的印象,即粗糙程度越大,摩擦系数也将